

## **ACUMULACIÓN TÉRMICA EN HORMIGÓN DE LA ENERGÍA SOLAR CAPTADA POR UN CONCENTRADOR TIPO FRESNEL LINEAL PARA GENERACIÓN DE VAPOR**

M. Gea, F. Tilca, C. Placco, R. Caso, A. Machaca y L. Saravia  
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta  
e-mail: marcelogea@gmail.com

### **RESUMEN**

Se construyó y estudió un acumulador térmico constituido por un bloque de  $0,20 \text{ m}^3$  de hormigón en contacto con una grilla de caños que lo atraviesa y por la cual circula el vapor generado por un colector de espejos Fresnel lineal de  $43 \text{ m}^2$ . En la fabricación del hormigón se utilizaron agregados pétreos con cuarcita a fin de obtener una buena respuesta dinámica para la acumulación de calor. Se midieron las propiedades térmicas del material y se realizó un estudio experimental de la carga del acumulador midiendo la evolución de la temperatura en distintos puntos. Se elaboraron un modelo teórico y un programa de simulación cuyos resultados fueron contrastados con datos experimentales. Se confirmó la sencillez constructiva del sistema y su buen comportamiento térmico dinámico para la acumulación del calor. Se validó el modelo teórico que permitirá optimizar el diseño en las siguientes etapas del estudio.

### **Palabras clave**

Energía solar. Acumulación térmica. Concentrador Fresnel lineal. Generación de vapor.

### **INTRODUCCIÓN**

El uso de dispositivos de acumulación permite el aprovechamiento de la energía solar durante las horas posteriores a la puesta de sol. Para la acumulación térmica se utilizan diversos materiales y tecnologías que son en general de construcción sencilla. Por ello los costos son relativamente bajos, lo que permite el empleo de estos sistemas en numerosas aplicaciones, por ejemplo, en centrales de generación de potencia eléctrica termo-solares.

Se describen en este artículo la construcción, los ensayos y la simulación de un equipo de acumulación térmica que funciona acoplado a un sistema de generación de vapor de agua que utiliza la radiación solar captada por  $43 \text{ m}^2$  de área de espejos en una configuración Fresnel lineal.

#### *Concentrador Fresnel lineal*

Una de las formas de aprovechamiento térmico de la energía solar es la generación directa de vapor de agua a medianas y altas temperaturas mediante distintas tecnologías de concentración de la radiación. Existe actualmente un fuerte impulso para el crecimiento del desarrollo de centrales solares térmicas para producción de electricidad debido a un marcado incremento de los mercados, la aparición de nuevas tecnologías y materiales y la disposición de subsidios en distintos países para ese fin. Los sistemas de concentración comúnmente utilizados en las plantas de generación de potencia son los de discos parabólicos, de receptor central y de concentrador cilindro parabólico.

Un concepto más nuevo es el concentrador Fresnel lineal que se caracteriza por la sencillez constructiva en relación a las otras tecnologías. Los concentradores también son cilíndrico-parabólicos pero de muy baja curvatura. Se instalan a nivel del piso y siguen la trayectoria aparente del sol girando alrededor de ejes axiales horizontales. Los espejos concentran la radiación solar directa en un absorbedor que se encuentra fijo a algunos metros de altura. Este consiste en una torre lineal con la cavidad en su cara inferior.

Durante 2008 ha sido ensayado un prototipo de  $24 \text{ m}^2$  de espejos lineales, poniendo a punto sus partes (Saravia et al., 2008). Consta de 8 espejos lineales ligeramente curvados que concentran la radiación solar en el absorbedor que se encuentra a 4 metros de altura. Por el absorbedor pasa el agua que sube su temperatura y se evapora. Ha mostrado un funcionamiento correcto produciendo vapor a  $140^\circ\text{C}$  y una presión de  $7 \text{ kg/cm}^2$ . En el absorbedor se ha logrado obtener temperaturas de hasta  $200^\circ\text{C}$ . No se intentó levantar más la presión ya que ella fue el valor de diseño para el circuito de agua. Este prototipo se ha usado entre febrero y noviembre del 2008.

Se ha colocado la instrumentación necesaria para la medida del sistema en funcionamiento: sensores de temperatura, de radiación, de flujo de agua, de presión en el absorbedor y el datalogger para recoger los datos. En la Figura 1 donde se puede observar una foto del equipo de  $24 \text{ m}^2$ .



*Figura 1- Vista del concentrador Fresnel lineal de 24 m<sup>2</sup>*

Sobre la base de los resultados se diseñó un segundo prototipo de 43 m<sup>2</sup> de área de espejos. En él se incorporan un conjunto de modificaciones tendientes a mejorar su performance en el circuito de agua, en la eficiencia del absorbedor y en la relación de concentración.

### **SISTEMA DE ACUMULACIÓN TÉRMICA**

El desarrollo más importante de unidades de acumulación de calor en materiales sólidos para generadores de vapor de centrales de potencia fue realizado en el proyecto “Midterm Storage Concepts – Further Development of Solid Media Storage Systems” (Tamme et al., 2002), en el cual se estudiaron intercambiadores compuestos por materiales sólidos en contacto con una grilla de caños que los atraviesan y por los cuales circula el fluido que transporta el calor.

La tecnología desarrollada para el material sólido de acumulación se enfoca tanto en las propiedades termofísicas: densidad, conductividad, calor específico y coeficiente de expansión como en los aspectos de costo-eficiencia de los materiales y métodos constructivos.

En cuanto a las propiedades del material sólido cabe destacar que una alta capacidad calorífica reduce el volumen de acumulación y una alta conductividad térmica incrementa la dinámica de la transferencia de calor del sistema. El coeficiente de expansión térmica debe permitir un acople con los caños metálicos en la dilatación y la contracción durante los ciclos de trabajo.

De las conclusiones del citado proyecto surge el hormigón como uno de los materiales sólidos con características apropiadas para la acumulación térmica, en particular por su bajo costo relativo, su alta resistencia mecánica y la sencillez del manejo de la pre-mezcla.

En el medio local existe además un conocimiento de la tecnología del hormigón tanto a nivel de desarrollo tecnológico como de la mano de obra debido a su uso generalizado en la industria de la construcción.

### **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA UNIDAD PROTOPTIPO**

A fin de estudiar el sistema constructivo y el comportamiento térmico del hormigón como elemento de acumulación se construyó una unidad acoplada a un colector de espejos Fresnel lineal de 43 m<sup>2</sup>. De los cálculos de prediseño surgió que una unidad de 0,205 m<sup>3</sup> (0,32 m x 0,32 m x 2 m) permitirá ensayar ciclos de carga y descarga de alrededor de 2 horas dependiendo de la amplitud térmica de los ciclos.

El intercambiador de calor está compuesto por una grilla de 16 caños de hierro de 27 mm de diámetro exterior y 20,5 mm de diámetro interior, colocados en paralelo, distribuidos en un arreglo cuadrado de 4 por 4 caños con una separación entre ejes de 80 mm. Estos están soldados a distribuidores - colectores secundarios de 38 mm y éstos a uno principal de 42,8 mm, ver fotos en figura 2.

Los agregados pétreos que se usaron para fabricar el hormigón tienen un gran contenido de cuarcita (el agregado fino tiene más de un 95% de este mineral). Esta tiene una alta conductividad y permite obtener un material con elevada difusividad térmica, lo que genera una mejor respuesta dinámica para la acumulación de calor.

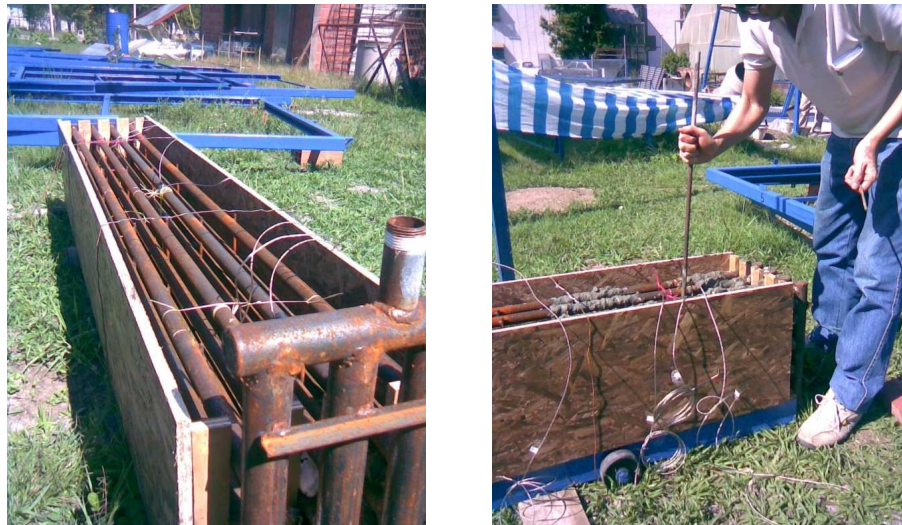


Figura 2: Fotos del intercambiador de calor, se observa la ubicación de las termocuplas y el colado del hormigón.

El encofrado se realizó sobre una estructura con ruedas que permite la ubicación del acumulador en la posición de trabajo y el acompañamiento de los movimientos del absorbente en su ajuste de acuerdo al día del año. Una vez fraguado el hormigón, fue recubierto por una aislación térmica compuesta por una capa de 2 pulgadas de lana de vidrio.

### DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL HORMIGÓN

La conductividad térmica del hormigón está influenciada fundamentalmente por las características mineralógicas del agregado. Depende también de la dosificación, la densidad, la humedad y la temperatura del hormigón. Para su determinación se determinó previamente en una probeta la difusividad térmica del material mediante la técnica de la llama. Este ensayo se describe a continuación.

Un punto central de una de las caras de la probeta se calienta haciendo incidir un pulso de calor que es absorbido en la superficie (Figura 3). Como consecuencia de ello se produce un incremento de temperatura en la cara opuesta. Este incremento se mide en función del tiempo mediante una termocupla situada en la línea de transmisión de calor y un sistema de adquisición de datos. La señal de temperatura registrada se procesa usando un modelo matemático que resuelve la ecuación diferencial para la conducción del calor en régimen transitorio.

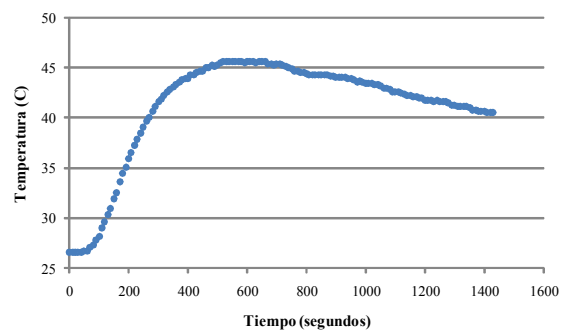


Figura 3: Foto del ensayo con el método de la llama y evolución de la temperatura en la cara opuesta al pulso de calor

También se midieron en laboratorio el calor específico  $C_p$  y la densidad  $\rho$  de una muestra del hormigón. La conductividad se obtuvo utilizando la ecuación de la difusividad térmica  $\alpha$ :

$$k = \rho \cdot C_p \cdot \alpha \quad (1)$$

Los valores medios de las propiedades térmicas se presentan en la siguiente tabla:

Difusividad térmica $\alpha$	Densidad $\rho$	Calor específico $C_p$	Conductividad térmica $k$
$1,37 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$	$2150 \text{ kg} / \text{m}^3$	$990 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{C}$	$2,9 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{C}$

Tabla 1: Propiedades obtenidas del hormigón

Se comprueba que la conductividad térmica encontrada está dentro del rango correspondiente al de hormigones con agregados cuarcíticos que brinda la bibliografía (Montanaro et al., 2003 y Tatro, 2006). Éste se encuentra entre 2,3 y 3,3 W/mC según la porosidad, el contenido de humedad y la temperatura.

### ENSAYO DE CARGA DEL ACUMULADOR

Para realizar los ensayos del comportamiento del acumulador térmico se colocaron los siguientes medidores: medidor de caudal de agua a la entrada del absorbedor, solarímetro, medidor de presión del vapor, nueve termocuplas para alta temperatura distribuidas en el interior del acumulador de hormigón y a la entrada y salida (Figura 5) y termocupla para temperatura ambiente.

Inicialmente se realizaron mediciones preliminares de temperaturas en la superficie del bloque de hormigón, sin aislación térmica, a fin evaluar cualitativamente la evolución del frente de temperaturas durante la carga del acumulador. Con ellas se observó que el avance del frente térmico es más rápido en la parte superior del bloque debido a que, antes de uniformarse el acumulador a la temperatura de saturación, existe una diferencia de temperaturas entre el vapor sobrecalentado que circula por los conductos superiores y el agua producida por la condensación que ocupa los conductos inferiores.

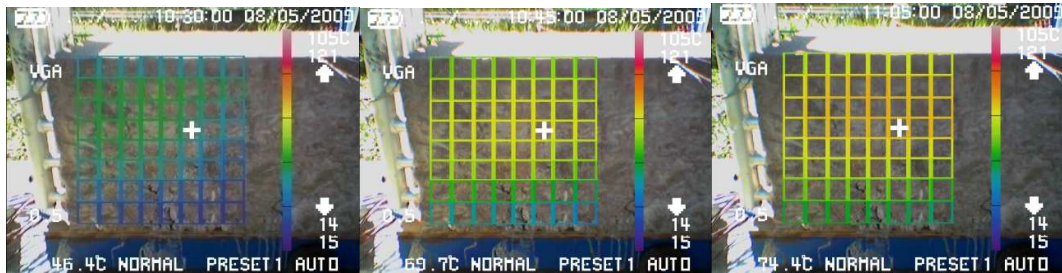


Figura 4: termogramas de una porción del acumulador durante la carga térmica

Los ensayos consistieron en medir las temperaturas en distintos puntos del acumulador durante la carga térmica producida por el vapor generado en el absorbedor del equipo. La regulación de la presión del vapor en el sistema se realizó con una válvula instalada a la salida del acumulador. Se probó el equipo a distintas presiones iniciando las mediciones con el hormigón a temperatura ambiente hasta la carga térmica completa.

Se observó en los ensayos que durante la carga existe un frente térmico a la temperatura de saturación del vapor de agua que va avanzando desde el extremo por donde ingresa el vapor. Cuando llega este frente a una sección determinada, la temperatura pasa rápidamente desde la temperatura inicial de la masa hasta la temperatura máxima.

Se obtuvo la evolución de las temperaturas en tres secciones transversales del bloque, sobre uno de los caños internos de la grilla. En cada sección se tomaron datos de termocuplas colocadas sobre la superficie externa del caño, y dentro de la masa de hormigón (figura 5).

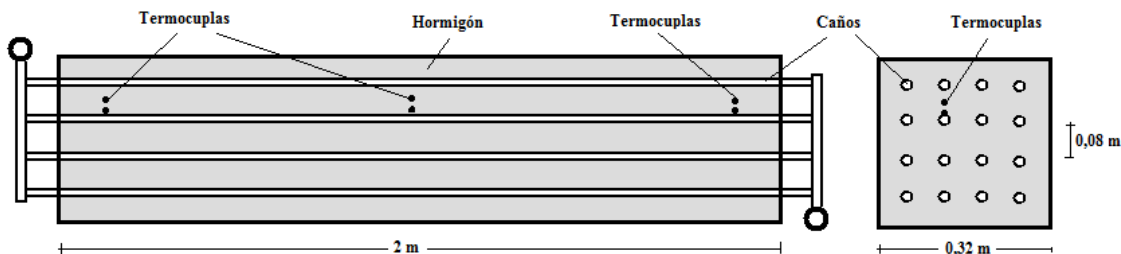


Figura 5: Esquema de la distribución de caños en el acumulador y ubicación de las termocuplas

## ESTUDIO TEÓRICO Y SIMULACIÓN

Dada la simetría de la grilla del intercambiador, se estudió teóricamente una porción del acumulador formado por uno de los caños internos que transfiere calor a una masa de hormigón que lo envuelve, hasta una distancia de 0,04 m del eje del caño.

Este modelo considera las siguientes hipótesis: por el caño circula vapor saturado con un caudal igual a la 1/16 parte del total; el sistema formado por un caño y la masa de hormigón no intercambia calor con los sistemas caño - hormigón vecinos por la simetría del conjunto; la transferencia de calor en el hormigón tiene dirección radial; la resistencia conductiva del caño es despreciable.

Con ello, la ecuación de balance de calor en la superficie interna del caño es la siguiente:

$$h A (T_{\infty} - T_s) + k (2 \pi r) \partial T / \partial r = \rho c_p V \partial T / \partial t \quad (2)$$

$A$  = área lateral del caño

$r$  = coordenada radial

$T_{\infty}$  = temperatura del vapor fuera de la capa límite

$\rho$  = densidad del hormigón

$T_s$  = temperatura superficial del caño

$c_p$  = calor específico del hormigón

$k$  = conductividad térmica del hormigón

$V$  = volumen del elemento del hormigón

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  involucra el calor de cambio de fase de la condensación. Para tubos horizontales con velocidad de vapor baja,  $h$  puede calcularse con la siguiente expresión (Incropera and De Witt, 1996)

$$h = 0,555 \{ g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}' / (\mu_l (T_{sat} - T_s) D) \}^{1/4} \quad (3)$$

con

$$h_{fg}' = h_{fg} + 3/8 c_{p,l} (T_{sat} - T_s) \quad (4)$$

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m / s^2$ )

$\mu_l$  = viscosidad del líquido ( $kg / s m$ )

$\rho_l$  = densidad del líquido en ( $kg / m^3$ )

$T_{sat}$  = temperatura del vapor saturado (K)

$\rho_v$  = densidad del vapor en ( $kg / m^3$ )

$T_s$  = temperatura superficial del caño (K)

$k_l$  = conductividad térmica del líquido en ( $W / m K$ )

$D$  = diámetro del caño (m)

$h_{fg}$  = calor latente del agua ( $J / kg$ )

$c_{p,l}$  = calor específico del agua del líquido ( $J / kg K$ )

$h_{fg}'$  = calor latente modificado ( $J / kg$ )

Para la simulación de los circuitos que conforman el modelo térmico se utilizó el programa SIMUSOL (Saravia et al., 2000). La simulación de un sistema térmico con este soft se realiza a través de dos etapas. En la primera se dibuja el circuito equivalente del acumulador en un diagrama. Se definen además los valores de los elementos del circuito en un cuadro de datos, las condiciones iniciales, las condiciones de borde, la rutina de integración y los parámetros a estudiar. En una segunda etapa, el programa interpreta los datos del circuito y calcula la evolución de las variables térmicas en el tiempo (temperaturas o flujos de calor) utilizando como datos de entrada archivos con los valores medidos (temperatura del vapor a la entrada). Los resultados son presentados en archivos con tablas y en gráficos.

Para encontrar la distribución de temperaturas en las direcciones longitudinal y radial del acumulador en función del tiempo se realizó una discretización espacial del acumulador. En la dirección longitudinal se dividió sistema en 10 elementos transversales de 0,20 m de largo identificados con el subíndice  $i$ . Y a cada uno de estos elementos se lo discretizó en 5 anillos concéntricos en la dirección radial (subíndice  $j$ ) y un último elemento exterior de forma circular por dentro y cuadrada por fuera. Se constituyeron circuitos térmicos como el que se muestra en la Figura 6.

La resistencia  $R_{Hi}$  representa la transferencia de calor por convección entre el vapor y la superficie del caño en un elemento  $i$  de la discretización longitudinal y las resistencias  $R_{Kij}$  representan las resistencias conductivas de los elementos  $i$  de hormigón a la transferencia de calor en la dirección radial  $j$ .

Los acumuladores  $CC_i$  representan la capacidad calorífica de los elementos de caño y los  $CH_{ij}$  representan la capacidad calorífica de los elementos de masa  $M_{ij}$  del hormigón.



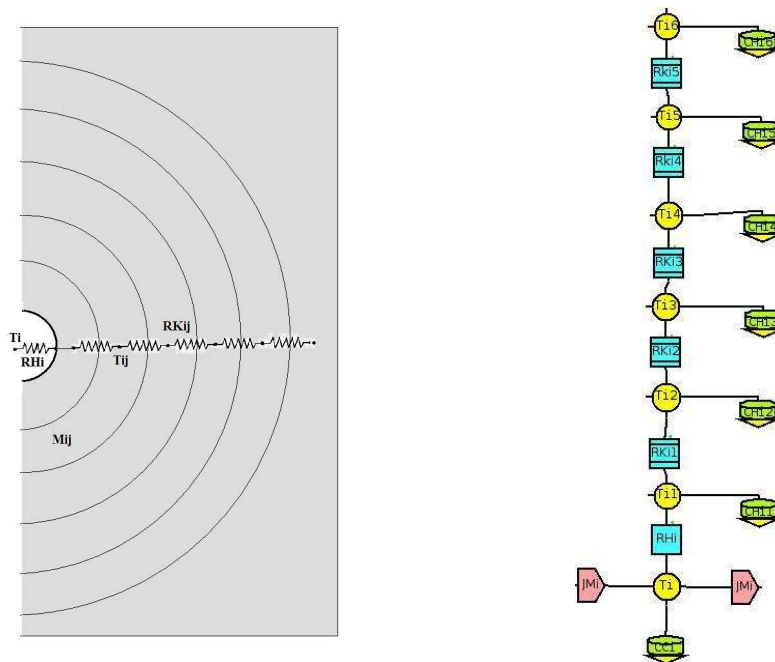


Figura 6: Esquema del circuito térmico para cada elemento  $i$  de la discretización y su representación en SIMUSOL

Las fuentes  $JM_i$  representan el flujo de masa de vapor que va intercambiando calor con cada elemento del sistema discretizado. La temperatura  $T_i$  es la temperatura del fluido en distintos puntos en la dirección longitudinal y los nodos  $T_{ij}$  representan la temperatura de cada elemento de masa considerado isotérmico en la discretización.

Las expresiones de  $h$  y  $h_{fg}$  se escriben en el programa como funciones y las propiedades del fluido se incorporaron como tablas para que sean evaluadas para las distintas temperaturas del sistema. Para ajustar el modelo se compararon los resultados teóricos con los experimentales tomando como parámetro de ajuste el flujo de vapor del cual no se contaba con mediciones precisas.

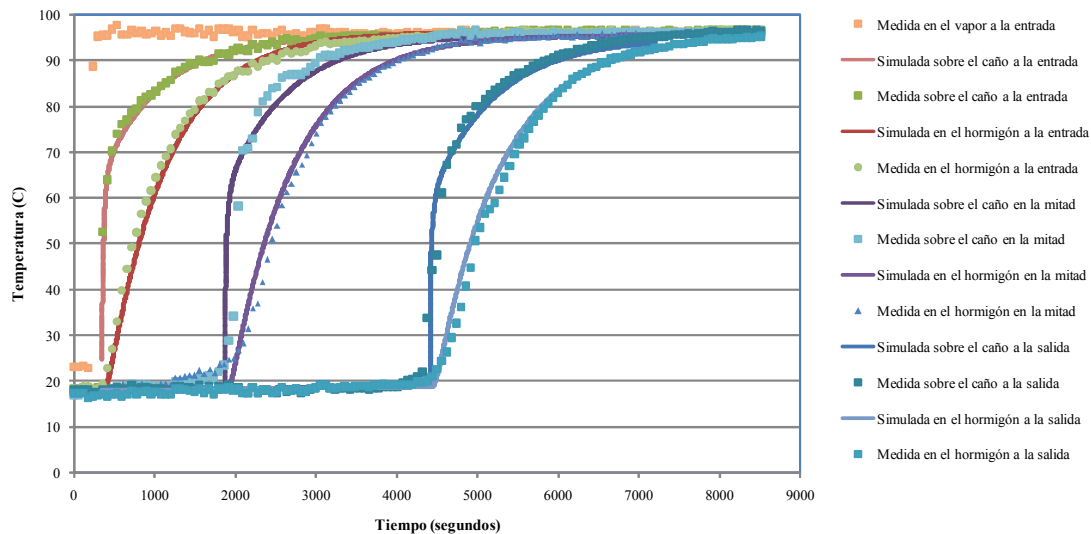


Figura 7: Temperaturas medidas y simuladas en distintos puntos del acumulador

Los resultados de la simulación se presentan en la figura 7. Se graficaron los valores de temperatura en tres posiciones longitudinales del acumulador: en la entrada (a 20 cm del borde), en la mitad y en la salida (a 20 cm del borde), en correspondencia con los puntos donde se colocaron las termocupas. Para cada una de las tres posiciones se presenta la temperatura de la superficie externa del caño y la temperatura de la masa de hormigón, a 4 cm del eje del caño.

Se observa en el gráfico de la figura 7 la evolución de la carga del acumulador, con el frente térmico avanzando en la dirección del fluido. Se graficaron además los datos experimentales, los que permiten verificar la validez del modelo de la simulación.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con este trabajo se obtuvieron los primeros resultados del funcionamiento del acumulador en la etapa de carga térmica a presión normal. Se confirmó la sencillez constructiva del sistema y su buen comportamiento mecánico ya que no se observaron roturas por efecto de la expansión.

Los ensayos permitieron validar un modelo del acumulador. Con este modelo será posible realizar dimensionados y encontrar la separación óptima entre caños. Para ello será necesario definir además el rango de temperaturas de trabajo en los ciclos de carga y descarga.

Otros trabajos futuros que quedan planteados son el estudio de otros agregados en la dosificación y un mejoramiento en la metodología de llenado a fin de seguir mejorando las propiedades térmicas del hormigón. También deberá ensayarse el equipo en ciclos completos de carga y descarga a altas presiones y temperaturas para comprobar su respuesta a exigencias reales de trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Se brinda un especial agradecimiento al Dr. Alejandro Hernández y al Sr. Clementino Contreras por su colaboración en la determinación de las propiedades térmicas del hormigón.

## REFERENCIAS

- Incropera F. y De Witt D. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4ª edición pp. 311-396. Wiley y Sons, New York.
- Montanaro M., Peralta M. y Di Maio A, (2003) Distribución de temperaturas en probetas de hormigón sometidas a acciones térmicas. Rosales, Cortínez y Bambill (Editores). *Mecánica Computacional Vol. XXII*. Argentina.
- Saravia L. y Saravia D. (2000) Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. *Avances Energías Renovables*, Vol. 4, pp. 8.17 - 8.23.
- Saravia L., Gea M., Fernández C., Caso R., Hoyos D. y Salvo N. (2008) Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel de 24 m<sup>2</sup> de área. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11. Pp. 3.14 – 3.21.
- Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W.D., Zunft, S., (2002). Innovative thermal energy storage technology for parabolic trough concentrating solar power plants. In: *Proceedings of EuroSun 2002, The 4th ISES Europe Solar Congress*.
- Tatro, Stephen (2006) Thermal Properties pp. 226-230 en *Significance of test and properties of concrete*. Editores Lamond J. and Pielert J. ASTM International. West Conshohocken.

**ABSTRACT:** A heat accumulator was constructed and studied. It's a block of 0.20 m<sup>3</sup> of concrete in contact with a grid of pipes that crosses it and through which circulates the vapor generated by a linear Fresnel reflectors of 43 m<sup>2</sup>. In the manufacture of concrete were used quartzite stone aggregates to obtain good dynamic response to heat accumulation. The thermal properties of the material were evaluated and an experimental study measuring the temperature charge monitoring at different points were carried out. A theoretical model and a simulation program were developed, and the results were compared with experimental data. The constructive simplicity and good performance system thermal dynamic heat accumulation were confirmed. The theoretical model that will optimize the design in the following stages of the study was validated.

**Keywords:** Solar energy. Thermal storage. Linear Fresnel concentrator. Steam generation.